

CAPITULO I.- CALORIMETRIA DEL VAPOR DE AGUA

GENERACIÓN DE VAPOR DE AGUA. Cuando al agua se le agrega energía calorífica, varían su entalpía y su estado físico. A medida que tiene lugar el calentamiento, la temperatura del fluido aumenta y por lo regular su densidad disminuye. La rapidez de la vaporización depende de la velocidad con la cual se transmite el calor al agua.

La temperatura a la cual se produce a ebullición, depende de la pureza del agua y de la presión absoluta ejercida sobre ella. Para el agua pura la temperatura de ebullición tiene un valor determinado para cada presión y es menor a bajas que a altas temperaturas.

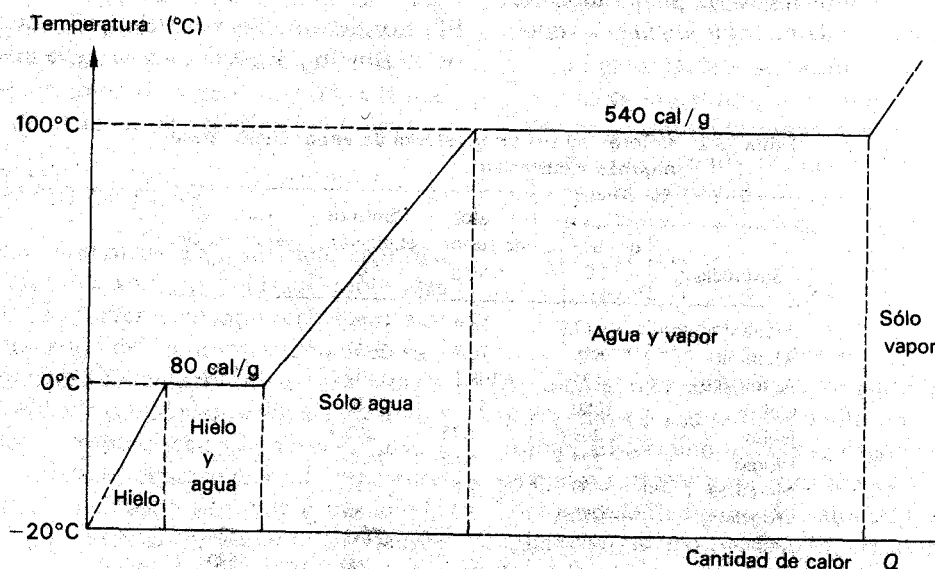


Fig. 18-7 Variación de la temperatura al variar la energía térmica del agua.

VAPOR DE AGUA SATURADO. El vapor producido a la temperatura de ebullición correspondiente a su presión (absoluta) se llama saturado. El vapor saturado puede estar exento completamente de partículas de agua sin vaporizar o puede llevarlas en suspensión. Por esta razón el vapor puede ser seco o húmedo.

En la producción de vapor de agua saturado la absorción de energía tiene lugar en dos etapas:

- adición de la entalpía del líquido, h_f y
- adición de la entalpía de vaporización h_{fg} .

Todos los cuerpos cuya temperatura es superior a -273°C poseen energía. Para el agua y su vapor resulta más práctico tomar como base de temperatura 0°C que el cero absoluto.

Entalpía del líquido h_f . Es el número de kilocalorías necesarias para elevar un Kg. De agua desde 0°C a su temperatura de ebullición a una presión absoluta determinada.

Esta cantidad es igual al producto del calor específico medio del agua por la temperatura de ebullición.

Entalpía de vaporización h_{fg} . Es la energía calorífica, en Kcal. , necesaria para convertir 1 Kg de agua líquido en vapor seco a la misma temperatura y presión. La entalpía de vaporización consta de dos sumandos: la energía interna y el trabajo realizado al efectuar la variación de volumen de 1 kg de agua a 1 Kg de vapor seco a la misma presión reinante; ambos sumandos en Kcal. / Kg El trabajo que se realiza, equivalente en calorías es:

$$T = P(v_g - v_f) / J$$

Donde:

J = 427 kgm por kcal

P = presión absoluta del vapor, en kg/m²

v_g = volumen del agua formado, en m³ por Kg

v_f = volumen del agua a la temperatura de ebullición, en m³ por Kg

La energía interna de vaporización u_{fg} es la energía en kcal necesaria para vencer la cohesión de las moléculas del agua a la temperatura de ebullición, y es igual a:

$$u_{fg} = h_{fg} - P(v_g - v_f) / J$$

Entalpía total del vapor de agua saturado seco h_g : La entalpía total, h_g , de 1 kg de vapor saturado seco, sobre 0°C, es la suma de la entalpía del líquido y de la entalpía de vaporización.

$$h_g = h_f + h_{fg}$$

La entalpía total de vapor de agua saturado seco depende de su presión.

Volumen específico del vapor de agua saturado seco: Los volúmenes específicos v_g , en metros cúbicos, ocupados por 1 kg de vapor de agua saturado seco. Estos volúmenes varían inversamente con la presión.

Densidad del vapor de agua saturado seco d_g : Es el peso del vapor de agua en kilogramos por metro cúbico y su recíproco es el volumen específico v_g . La densidad es directamente proporcional a la presión, es decir, cuando más elevada es la presión, más grande es el peso de vapor por metro cúbico.

Título del vapor (calidad): Es la cantidad de vapor seco por kilogramo de vapor húmedo. El título x del vapor se puede expresar como porcentaje o como una fracción decimal.

Entalpía total del vapor de agua saturado húmedo: La entalpía total de 1 kg de vapor de agua saturado húmedo es más pequeña que la de 1 kg de vapor de agua saturado seco para la misma presión. El título del vapor solo afecta a la entalpía de vaporización y no modifica la entalpía del líquido para una presión dada cualquiera.

La entalpía total de 1 kg de vapor húmedo sobre 0 °C, es

$$h_{gw} = h_f + x h_{fg}$$

Volumen específico y densidad del vapor de agua saturado húmedo. Cuando el título del vapor se expresa como fracción decimal, el volumen específico c_{wg} del vapor de agua saturado húmedo vale

$$v_{gw} = v_f + x (v_g - v_f)$$

La densidad del vapor es el recíproco del volumen específico.

Vapor de agua recalentado. La temperatura y la entalpía total del vapor de agua saturado, a una presión cualquiera, puede aumentarse, añadiéndole calor adicional. Cuando la temperatura del vapor es mayor a la de saturación correspondiente a la presión, se dice que el vapor está recalentado. El recalentamiento, por lo regular, se efectúa en un equipo independiente en donde el vapor no está en contacto con el líquido.

La entalpía total de 1 kg de vapor recalentado se puede calcular añadiendo a la entalpía total de 1 kg de vapor saturado seco, a la presión dada, la entalpía agregada en el proceso del recalentamiento. Esta última cantidad puede expresarse por $c_{ps} (t_s - t)$ en donde t_s es la temperatura del vapor recalentado, y t , la del vapor saturado a la presión absoluta existente. El calor específico medio del vapor recalentado C_{ps} varía con la presión y temperatura entre 0.44 para pequeños grados de recalentamiento a presiones inferiores a la atmosférica, hasta más de 2 para elevadas temperaturas y presiones.

Las ventajas del vapor recalentado son:

- El calor adicional comunicado al vapor hace que éste se comporte con más aproximación como gas perfecto que como vapor saturado.
- Los límites de temperatura en ciertas partes de los equipos que utilizan vapor pueden aumentarse.
- Se pueden eliminar o disminuir las pérdidas producidas por la condensación del vapor en las tuberías, máquinas y turbinas de vapor.

Determinación del título de un vapor. La calidad del vapor de agua saturado se determina por medio de calorímetros especiales. Los más comunes son:

- Calorímetro de separación
- Calorímetro de estrangulación o recalentamiento

En todas las determinaciones del título de un vapor el calorímetro debe estar aislado térmicamente, y, por otra parte, la muestra del vapor tomada debe ser representativa del vapor cuyo título se trata de determinar.

Calorímetros de separación. Se basan en separar la humedad del vapor húmedo que entra en el aparato. En este caso es necesario medir el peso de la humedad recogida en forma de agua y el peso del vapor seco que sale del calorímetro. Los calorímetros del tipo de separación se utilizan para determinar el título de vapores de agua muy húmedos y de los de baja presión.

La expresión del título en forma de fracción decimal es:

$$x = \frac{m_{ds}}{m_{ds} + m_m}$$

en donde:

m_{ds} = peso del vapor seco que pasa por el calorímetro, en kg.

m_m = peso de la humedad separada de m_{ds} de kg de vapor seco, en kg.

X = calidad del vapor.

Calorímetros de estrangulación o recalentamiento. Se fundan en que si el vapor se estrangula y a continuación se expande sin realizar trabajo o sin pérdida de calor, la energía total del vapor permanece invariable. Las pérdidas por radiación deben reducirse al mínimo, y, para ello, el calorímetro y el conducto de la unión a la tubería de vapor han de estar completamente aislados térmicamente.

El vapor entra por la tobera de toma de muestras y se expande al pasar por un orificio. A continuación entra en la cámara de vapor, escapándose finalmente por la parte alta. El exceso de humedad momentáneo se separa y reevapora dentro de la cámara de vapor, y el efecto viene indicado en proporción directa por el termómetro de recalentamiento situado en la trayectoria del vapor. Para saber la presión inicial del vapor es preciso servirse de un manómetro.

Puede establecerse la relación siguiente: la entalpía total del vapor saturado húmedo antes de la expansión ($h_f + xh_{fg}$) es igual a la entalpía total h del vapor recalentado después de la expansión.

$$x = \frac{h - h_f}{h_{fg}}$$

donde:

x = calidad del vapor, expresada en fracción decimal.

h = entalpía total del vapor recalentado a la presión absoluta del calorímetro, en kcal por kg.

h_f = entalpía del líquido a la presión inicial, en kcal por kg.

h_{fg} = entalpía de vaporización del vapor saturado seco a la presión absoluta inicial en kcal por kg.

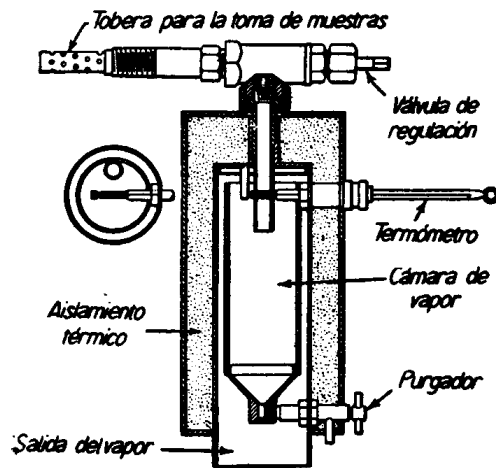
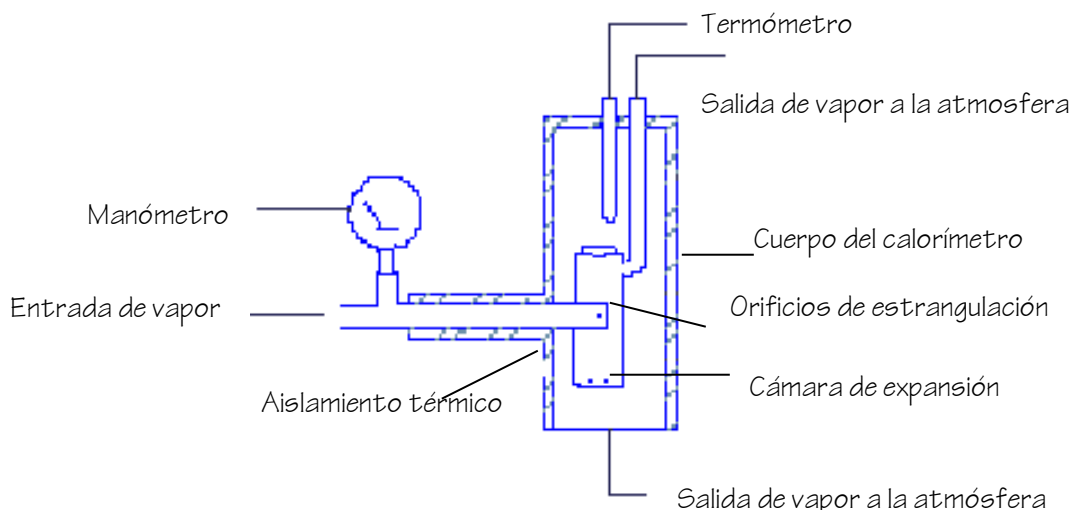


FIG. 35. Calorímetro Ellison.

En trabajos de gran exactitud es necesario aplicar las correcciones propias de lecturas de termómetros de mercurio expuestos al aire. Con la expansión del vapor hay que conseguir por lo menos 5.5 °C de recalentamiento.



EJEMPLOS

Ejemplo 1.- Hallar la entalpía y entropía totales de 1 Kg. de vapor de agua a una presión absoluta de 14 kg/cm^2 y con un título de 0.96.

Solución. Situar sobre el diagrama la intersección de la línea correspondiente al título 0.96 con la línea de presión absoluta de 14 kg/cm^2 . Leer en el extremo de la horizontal que pasa por la intersección de la entalpía total del vapor, que en este caso es 647.5 kcal por Kg., y, en el extremo vertical, el valor de la entropía, 1.505.

Ejemplo 2. - Se dispone de vapor de agua a una presión absoluta de 28 kg/cm^2 y a una temperatura de $371 \text{ }^\circ\text{C}$. Hallar la entalpía y entropía totales por Kg. de este vapor.

Solución. Hallar la intersección de la línea de presión absoluta 25 kg/cm^2 con la temperatura de $371 \text{ }^\circ\text{C}$. La entalpía total correspondiente a la intersección vale 753.75 kcal por Kg. y la entropía total 1.61.

Ejemplo .3. - En un ensayo efectuado con un calorímetro del tipo de estrangulación se obtuvieron los siguientes resultados: presión absoluta del vapor media inicial, 10.5 kg/cm^2 presión absoluta de escape, 1.033 kg/cm^2 ; temperatura del vapor en el calorímetro $126.7 \text{ }^\circ\text{C}$. Hallar el título del vapor.

Solución. Situar la intersección de la línea de temperatura $126.7 \text{ }^\circ\text{C}$ con la de la presión absoluta 1.033 kg/cm^2 . Moverse en sentido horizontal a partir de este punto hasta llegar a la línea de presión absoluta 10.5 kg/cm^2 y allí leer el título, el cual resulta ser de 0.976.

Ejemplo 4. - Vapor de agua a una presión absoluta de 17.5 kg/cm^2 y título de 0.99 se expansiona isoentrópicamente hasta alcanzar una presión absoluta de 0.105 kg/cm^2 . Hallar la entalpía total y el título del vapor después de haber sufrido la expansión.

Solución. Hallar la intersección de la línea de la presión absoluta 17.5 kg/cm^2 con la línea del título 0.99. A partir de este punto descender verticalmente (línea de entropía constante) hasta encontrar la línea de presión absoluta 0.105 kg/cm^2 . El título resulta ser de 0.765 y la entalpía total, 451.25 kcal por Kg.